4К

УДК 004.2

Н.А. Ковалев
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев
nikolay@onet.in.ua

Об одном методе динамического перестраивания цифровых интегрирующих машин

В статье рассматривается динамическое перестраивание цифровых интегрирующих машин. Применение методов неавтономной арифметики обеспечивает их многовариантную реконфигурацию, создавая предпосылки для повышения надежности и живучести без введения сложной дополнительной аппаратуры.

Введение

Цифровые интегрирующие машины (ЦИМ) обладают высокой точностью и быстродействием при решении ряда задач моделирования и управления как в реальном времени, так и с его опережением [1], [2]. Они реализуют эквивалентные системы дифференциальных уравнений Шеннона с помощью методов численного интегрирования по Стилтьесу.

Автономные системы управления реального времени, основой которых являются ЦИМ, могут эксплуатироваться в неблагоприятных условиях внешней среды, неэффективного охлаждения и ограниченного энергообеспечения. Эти факторы значительно повышают риски аппаратурных сбоев и отказов. Повышение надежности и живучести ЦИМ в этих условиях может быть связано с управлением использования ее аппаратных ресурсов, и как следствие, рассеиваемой тепловой мощностью и энергопотреблением в процессе вычислений. Это можно осуществить путем изменения интенсивности вычислений, которая зависит от параметров точности и быстродействия ЦИМ. Следовательно, сохранение работоспособности ЦИМ в сложных ситуациях должно предусматривать преднамеренную деградацию ее основных характеристик. При наступлении благоприятных условий следует максимально возможно восстанавливать эти характеристики. Таким образом, возникает необходимость перестраивания ЦИМ в процессе ее работы.

Появление архитектурно развитых типов элементных баз сверхбольшой интеграции (FPGA, CPLD, ASIC, Structured ASIC, ULC и т.д.) позволяет на новом уровне разрабатывать технологии реконфигурируемых вычислений (Reconfigurable computing, RC-технологии). При этом к современным и перспективным элементным базам выдвигается требование возможности управления уровнем задействования их архитектурных ресурсов, что позволит изменять энергетические характеристики ЦИМ и «обходить» возникающие в ней неисправности. Так, уменьшение потребляемой мощности ЦИМ, реализованной на базе FPGA, достигается прекращением тактирования незанятых в

вычислениях ее ресурсов (технология «Gated Clocks») и минимизацией переключений в неиспользуемой комбинационной логике [3]. Это также исключает влияние действия этих ресурсов на процесс вычислений.

Наиболее известные RC-технологии [4], [5] не могут обеспечить простой механизм самостоятельной перестройки ЦИМ в процессе вычислений, требуют существенных дополнительных аппаратурных, временных и проектных затрат. Поэтому необходимо разработать метод автономной динамической реконфигурации ЦИМ, предполагающий управление степенью использования ее ресурсов с целью адекватного условиям функционирования изменения энергетических характеристик и ее самовосстановление в случае неисправностей. При этом должны требоваться минимальные дополнительные аппаратные и временные затраты.

Архитектура и реконфигурация ЦИМ

Одним из параметров, по которому можно перестраивать работу ЦИМ, является порядок точности используемой в вычислениях формулы численного интегрирования по Стилтьесу. Он определяет характеристики точности и быстродействия ЦИМ, а также степень использования логических ресурсов цифровых интеграторов (ЦИ), составляющих ее основу. В [6] показаны преимущества применения в ЦИМ методов неавтономной арифметики. Их использование позволяет организовать реконфигурацию ЦИМ по еще одному параметру, – основанию избыточных симметричных систем счисления, в которой ЦИ реализуют неавтономные вычисления. Он определяет степень использования логических ресурсов как ЦИ, так и коммутационной сети (КС), изменяя быстродействие ЦИМ. Ввиду небольшого количества сигнальных линий в каналах передачи цифр приращений интегрируемых переменных между квазипараллельными ЦИ значительно упрощается перестраивание работы КС. Использование разных оснований позволяет также организовать много вариантов передачи данных в ней, в том числе при неисправностях каналов. Таким образом, комбинация вида «порядок точности – основание системы счисления» способна обеспечить многорежимное функционирование ЦИМ, создавая предпосылки для повышения ее характеристик надежности и живучести.

Рассмотрим одну из возможных архитектур ЦИМ и метод ее перестраивания, включающий алгоритмы и тактики преднамеренной деградации и восстановления параметров точности и быстродействия. Пусть ее основу составляют t квазипараллельных ЦИ (рис. 1). Для упрощения аппаратуры цифры данных представляются единым образом в дополнительном коде с двоичной разрядностью, зависящей от максимального основания систем счисления и определяющей число сигнальных линий в каналах КС. Для осуществления реконфигурации в состав ЦИМ вводятся устройство управления (УУ), t-входовый элемент «ИЛИ» (выделены серым цветом), а также специальные шины и сигналы (обозначены пунктирной линией). В состав КС дополнительно вводятся простые коммутирующие устройства, устанавливаемые на входах и выходах ЦИ. Единый режим работы ЦИ задается УУ по шине «Режим», несколько младших разрядов которой определяют порядок точности формулы интегрирования, а старших – основание систем счисления. Проверку правильности вычислений в ЦИ можно осуществлять методом косвенного функционального контроля квазипараллельных вычислительных устройств [7]. На входе «Внеш. усл.» УУ считывает код, соответствующий внешним условиям эксплуатации ЦИМ (температура, уровень энергопотребления и т.д.).

ЦИМ начинает работу с использованием формулы численного интегрирования максимального порядка точности в системе счисления с максимальным основанием. После каждого решения систем уравнений проверяется состояние каналов КС и формируется значение на каждой из шин «Сост. кан. *j*» ($j = \overline{1,t}$). Оно соответствует максимальному основанию системы счисления, цифры которого можно передавать по наименее исправному каналу, связанному с входом *j*-о ЦИ.

Возникновение нештатной ситуации проявляется формированием сигнала «Ошибка» при неисправностях ЦИ, неприемлемым значением на входе «Внеш. усл.», изменением значений на шинах «Сост. кан. 1» – «Сост. кан. *t*» при неисправностях в КС. В этих случаях предлагается такой алгоритм преднамеренной деградации основных характеристик ЦИМ:

1) УУ сигналом «Стоп» прерывает процесс вычислений. При этом производятся начальные установки ЦИ для повторного решения задачи и проверки состояния каналов;

2) УУ задает по шине «Режим» новый менее точный и/или скоростной режим вычислений;

3) осуществляются реконфигурации ЦИ и КС;

4) УУ снимает сигнал «Стоп», и начинается повторное решение задачи.

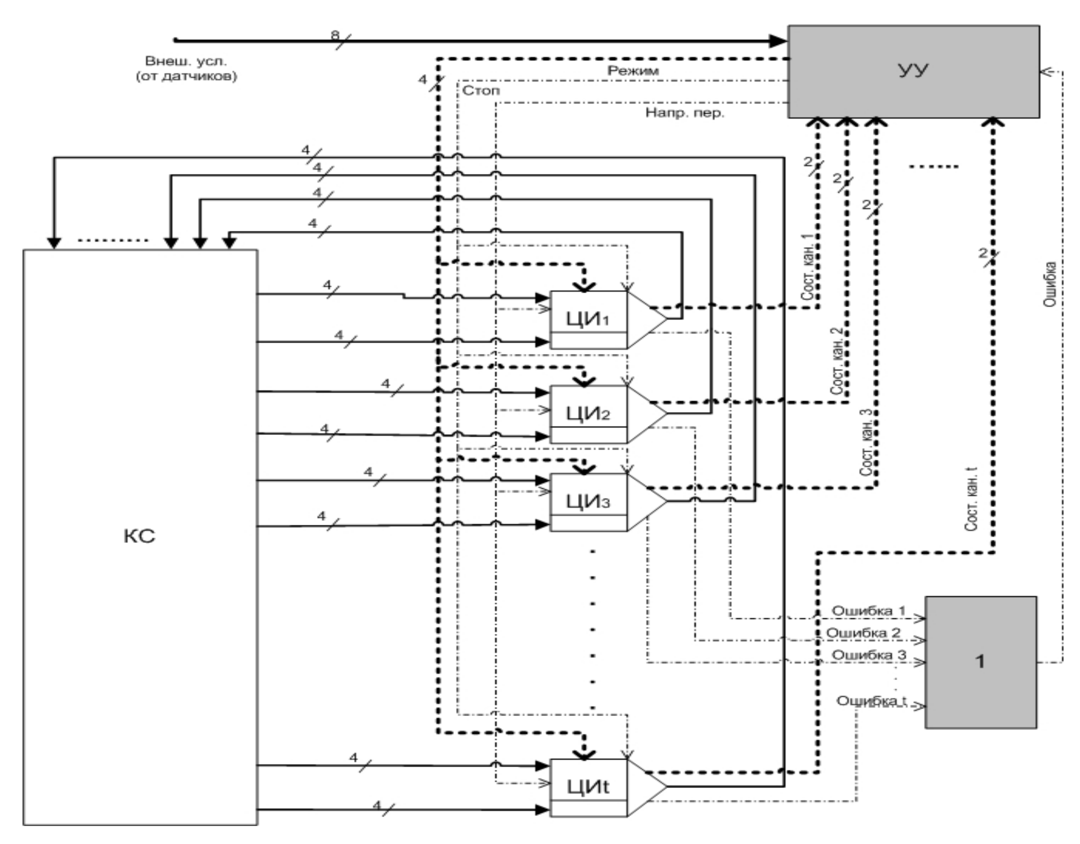


Рисунок 1 – Структура перестраиваемой квазипараллельной ЦИМ, реализующей вычисления по формулам интегрирования с порядком точности n = 2 – 5 в 8-й, 4-й или двоичной системах счисления

Выполнение алгоритма повторяется до тех пор, пока не исчезнут признаки нештатных ситуаций. Тактика деградации ЦИМ должна формироваться на основе экспериментально полученных зависимостей уменьшения энергетических показа-

телей ее работы и задействования оборудования, но по возможности сохранять ее точностные характеристики. Поэтому рекомендуется сначала уменьшать основание систем счисления и только затем – порядок точности формулы интегрирования.

В дальнейшем могут наступить более благоприятные внешние условия эксплуатации ЦИМ. С другой стороны, возникшие неисправности могут носить временный характер. Следовательно, появляется возможность определенного восстановления параметров точности и быстродействия ЦИМ, для чего можно использовать следующий алгоритм:

1) после решения очередной задачи УУ задает по шине «Режим» код нового более точного и/или скоростного режима работы ЦИ, запоминая код предыдущего;

2) производятся реконфигурации ЦИ и КС;

3) определенное число раз проводится решение задач с заданными параметрами точности и быстродействия.

Эти действия повторяются до появления любого признака нештатной ситуации. Тогда по ранее приведенному алгоритму преднамеренной деградации ЦИМ производится «откат» показателей ее работы. При этом в качестве текущего режима вычислений задается предыдущий (последний исправный).

Последовательность смены режимов вычислений при восстановлении основных характеристик ЦИМ должна также основываться на экспериментальных данных, предполагая плавное повышение энергетических параметров или постепенное задействование ресурсов во избежание быстрого вовлечения в работу отказавшего оборудования.

Перестраивание КС предусматривает вначале проверку состояний каналов со стороны входов ЦИ, а затем – со стороны их выходов. Поэтому каналы являются двунаправленными, направление передачи по ним контролируется УУ с помощью сигнала «Напр. пер.». По результатам проверки с помощью коммутирующих устройств осуществляется необходимая перекоммутация между исправными сигнальными линиями каналов и разрядами входов и выходов ЦИ.

УУ может основываться на несложном управляющем автомате. Количество дополнительно введенных сигналов и шин существенно меньше числа основных сигналов и шин в КС. Процедура реконфигурации ЦИМ вполне осуществима за небольшое количество тактов.

Построение и реконфигурация ЦИ

Рассмотрим подробнее построение и реконфигурацию ЦИ, составляющих основу ЦИМ. Базовой является архитектура ЦИ, вычисляющего по формуле максимального порядка точности в системе счисления с наибольшим основанием. С целью уменьшения дополнительных аппаратурных затрат, а также сохранения однородности ЦИМ целесообразно строить ЦИ как единое квазипараллельное вычислительное устройство. С этой целью на основе методики в работе [8] был разработан алгоритм неавтономного вычисления по общей формуле приращения интеграла Стилтьеса [2], эквивалентной целому рациональному выражению вида:

$$Z = X_1 X_2 + 2^{-l} X_1 X_3 + \sum_{s=1}^{m} C_s (Y_{4s} Y_{4s+1} - Y_{4s+2} Y_{4s+3}). \qquad (1)$$

Здесь результат Z соответствует приращению интеграла Стилтьеса, операнд X_1 – подынтегральной функции, остальные операнды – приращениям интегрируемых переменных на разных шагах процесса интегрирования. Значения коэффициентов C_s и числа слагаемых m зависят от порядка точности вычислений.

Алгоритм обрабатывает входные операнды и формирует результат в избыточных симметричных системах счисления по основанию $k = 2^l$, где l – целое, с цифрами в диапазоне $\left\{-\overline{\frac{k}{2},\frac{k}{2}}\right\}$, используя только операции сложения и сдвига, а также промежуточные переменные вида RY, RC, H и R:

1. $X_{1(-1)}=X_{2(-1)}=X_{3(-1)}=R_{-1}=0$; для $s=\overline{1,m}$ выполнить:

$$RY_{(4s)(-1)} = RY_{(4s+1)(-1)} = RY_{(4s+2)(-1)} = RY_{(4s+3)(-1)} = 0.$$

$$RC_{s(-1)} = C_s .$$

2. Для $i=\overline{0,p-1}$ выполнять пп. 3 – 10.

3. Для $s=\overline{1,m}$ выполнить: $RC_{si} = RC_{s(i-1)}k^{-1}$

4. Для $s=\overline{1,m}$ выполнить:

$$RY_{(4s)i} = RY_{(4s)(i-1)} + y_{(4s)i}RC_{si};$$

$$RY_{(4s+2)i} = RY_{(4s+2)(i-1)} + y_{(4s+2)i}RC_{si}.$$

5. $X_{2i} = X_{2(i-1)} + x_{2i}k^{-i}$;

$X_{3i} = X_{3(i-1)} + x_{3i}k^{-i}$.

6. $$H_i = kR_{i-1} + k^{-p}\{x_{2i}X_{1(i-1)} + x_{1i}X_{2i} + 2^{-l}\left(x_{3i}X_{1(i-1)} + x_{1i}X_{3i}\right)+$$

$$+\sum_{s=1}^{m}\left[\left(RY_{(4s)i}y_{(4s+1)i} + RY_{(4s+1)(i-1)}y_{(4s)i}\right) - \left(RY_{(4s+2)i}y_{(4s+3)i} + RY_{(4s+3)(i-1)}y_{(4s+2)i}\right)\right]\}.$$

7. Для $s=\overline{1,m}$ выполнить:

$$RY_{(4s+1)i} = RY_{(4s+1)(i-1)} + y_{(4s+1)i}RC_{si};$$

$$RY_{(4s+3)i} = RY_{(4s+3)(i-1)} + y_{(4s+3)i}RC_{si}.$$

8. $X_{1i} = X_{1(i-1)} + x_{1i}k^{-i}$.

9. $z_i = 0$.

10. $R_i = H_i$.

11. Для $i = \overline{p, p + \left]\frac{N}{s}\right[}$ (N – эквивалентная двоичная разрядность переменных) выполнять п. 3 – 8, 12 и 13.

12. $$z_i = \begin{cases} -\frac{k}{2}, & \text{если} \quad Hi < \frac{1-k}{2} \\ \ldots \\ -1, & \text{если} \quad -\frac{3}{2} \le Hi < -\frac{1}{2}; \\ 0, & \text{если} \quad -\frac{1}{2} \le Hi < \frac{1}{2}; \\ 1, & \text{если} \quad \frac{1}{2} \le Hi < \frac{3}{2}; \\ \ldots \\ \frac{k}{2}, & \text{если} \quad Hi \ge \frac{k-1}{2}. \end{cases}$$

13. $R_i = H_i - z_i$.

Алгоритм позволяет совмещать поразрядный ввод интегрируемых переменных и получение цифр результата со старших разрядов с запаздыванием на p шагов. Поэтому при неизменности точности вычислений число шагов Q для получения всех цифр результата составит:

$$Q = p + \left]\frac{N}{l}\right[.$$

Чтобы разрядности основных регистров и сигналов ЦИ не зависели от используемых систем счисления N выбирается как общее кратное их оснований, а задержка p – по максимальному из них. Рассмотрим реконфигурацию ЦИ с учетом особенностей общей формулы Стилтьеса, выражения (1) и методов неавтономной арифметики.

1. По порядку точности процесса интегрирования. Формулы разной точности отличаются необходимостью реализаций вычислений слагаемых вида (X_1X_2), ($2^{-l}X_1X_3$) или определенного числа слагаемых вида $C_s(Y_{4s}Y_{4s+1} - Y_{4s+2}Y_{4s+3})$ ($s = \overline{1,m}$). Структура этих слагаемых и порядок использования в них интегрируемых переменных одинаковы для формул интегрирования разного порядка. Поэтому предлагаются такие одновременные действия:

– управление подачей сигнала тактирования для регистров сдвига, применяемых для реализации п. 3, а также аккумуляторов и регистров, используемых для реализации пп. 4, 5, 7 и 8 алгоритма. Также необходимо управлять сигналами синхронного либо асинхронного сбросов этих регистров;

– управление подачей на входы ЦИ цифр, входящих в эти слагаемые переменных X и Y, для чего можно использовать небольшое количество элементов «И»;

– изменение значений коэффициентов C_s ($s = \overline{1,m}$), что осуществляется простой комбинационной схемой либо блоком памяти небольшого объема.

2. По основанию систем счисления. Вследствие универсальности предложенного алгоритма, принятого кодирования цифр, постоянства разрядностей основных регистров и сигналов базовая архитектура ЦИ способна правильно формировать разряды приращения интеграла Стилтьеса и в системах счисления с меньшими основаниями. Для этого необходимо заменить все регистры сдвига на l разрядов, используемые для реализации п. 3, формирования значения (kR_{i-1}) и параллельных кодов X_{1i}, X_{2i}, X_{3i} в соответствии с п. 5, 8 алгоритма, управляемыми регистрами сдвига на ($1 \div l$) разрядов. При этом:

– снижаются степени использования подсистем сумматоров и связанных с ними мультиплексоров для формирования целочисленных произведений вида (xX), (yRY) в соответствии с п. 6, а также параллельных кодов вида X и RY в соответствии с п. 4, 5, 7 и 8 алгоритма. Такое снижение особенно будет заметно при уменьшении оснований с большими значениями (k = 8, 16), что и покажут практические исследования. Для исключения переходных процессов в комбинационной логике нужно посредством элементов «И» управлять подачей операндов на входы этих сумматоров;

– сужается диапазон значений старших (l+2) разрядов переменной H, что приводит к уменьшению степени задействования аппаратуры для реализации п. 12 алгоритма.

Координирование перестраиванием ЦИ возможно с помощью комбинационной схемы, управляемой по шине «Режим». Оба типа реконфигурации могут выполняться одновременно за один такт.

Экспериментальные исследования

Современные микросхемы FPGA выступают оптимальной элементной базой для оценки эффективности разработанных методов реконфигурации ЦИМ. Поэтому на базе семейства Xilinx Spartan 3 создан прототип динамически перестраиваемой квазипараллельной ЦИМ. В ее состав входит 7 ЦИ, построенных по предложенному выше алгоритму. Они способны вычислять по формуле кубичных парабол в 8-й системе счисления в максимальном случае точности и быстродействия и по формуле прямоугольников в двоичной системе счисления в минимальном. При этом неавтономные вычисления в ЦИМ проводятся над полноразрядными приращениями с эквивалентной двоичной разрядностью 18. Создание, моделирование и оценка показателей работы ЦИМ проводились в САПР Xilinx ISE 9.2i Web Edition и Mentor Graphics ModelSim SE v.6.1g. Схемы описывались на языке VHDL.

Экспериментальные данные показывают следующее:

1) ресурсоемкость дополнительно введенной аппаратуры для проведения реконфигурации ЦИ составляет не более 7 % относительно ресурсоемкости его базовой архитектуры на большом диапазоне эквивалентной двоичной разрядности вычислений. Поэтому можно ожидать, что суммарный относительный объем оборудования для реконфигурации ЦИМ будет составлять всего 10 – 15%;

2) существенное сокращение объема высвобождаемого из вычислений оборудования (рис. 2) происходит при реконфигурации ЦИ в диапазоне высоких точностных и скоростных параметров вычислений. Это резко повышает шансы на быстрый «обход» отказов в ЦИМ, функционирующей с максимальными значениями основных характеристик, при незначительном их снижении. С другой стороны, реконфигурция, предусматривающая максимальную деградацию точности и быстродействия ЦИМ, позволяет вывести из вычислений более 90 % ее ресурсов. Это значительно повышает вероятность самовосстановления ЦИМ при большом числе неисправностей различного характера;

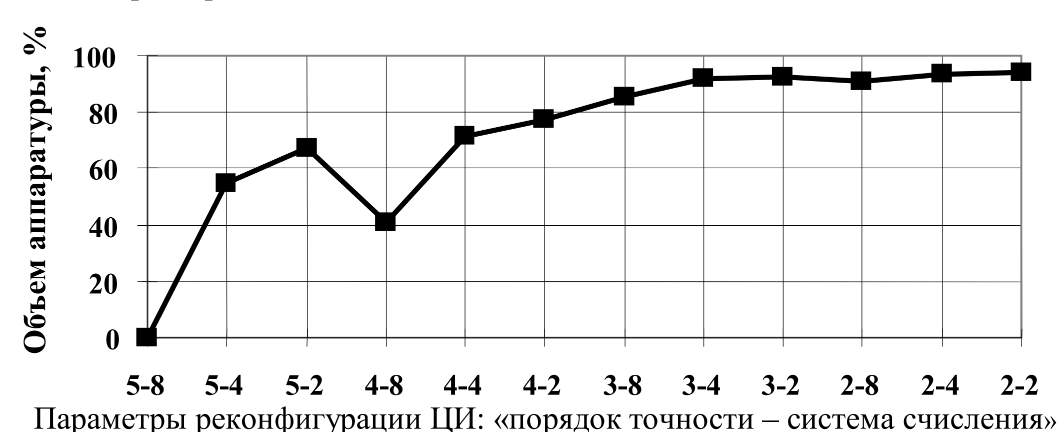


Рисунок 2 – Объем высвобожденного оборудования в процессе реконфигурации ЦИ

3) перестраиваясь с вычислений по формулам высокого порядка точности ($n = 4 – 6$) и большими основаниями ($k = 8, 4$) на вычисления по формуле прямоугольников в двоичной системе счисления, ЦИМ способны в 2 – 3 раза продлить срок своего автономного функционирования (рис. 3). При этом температура корпуса микросхемы уменьшается почти на 40 %, что существенно снижает вероятность выхода ее из строя при недостаточном охлаждении (рис. 4). Даже незначительное уменьшение максималь-

ных значений параметров точности и быстродействия снижает энергопотребление ЦИМ уже в 1,5 – 2 раза, а температуру корпуса микросхемы – на 25 – 30 %;

4) в очень неблагоприятных условиях функционирования оптимально перестраивать ЦИМ на вычисления по формуле трапеций в 4-й системе счисления, что обеспечивает приемлемые точность и скорость решения задач. Дальнейшая деградация основных параметров ЦИМ в плане большего снижения энергопотребления, тепловой рассеиваемой мощности и высвобождения аппаратуры малоэффективна;

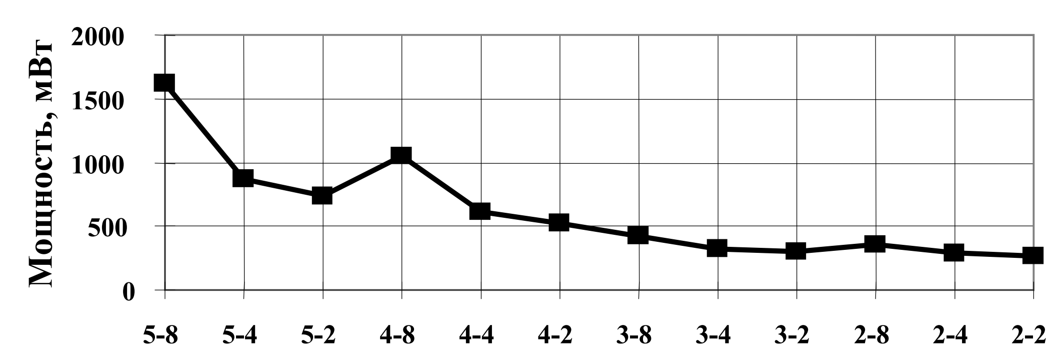


Рисунок 3 – Изменение мощности энергопотребления ЦИМ

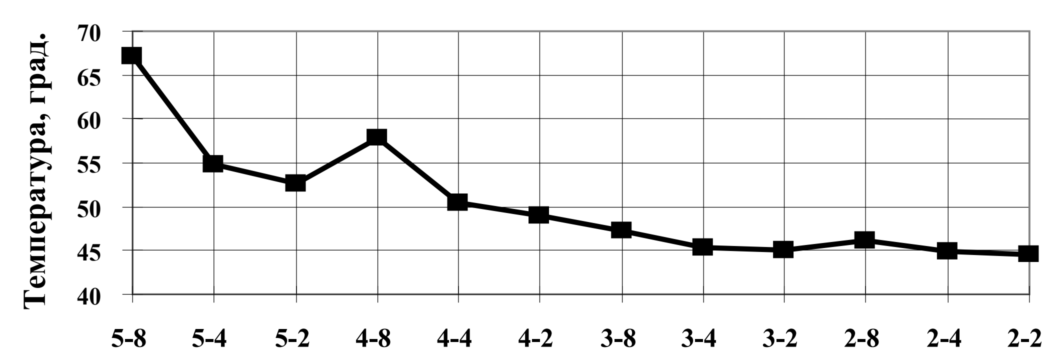


Рисунок 4 – Изменение температуры корпуса микросхемы FPGA

5) перестраивание ЦИМ на режим вычислений в системах счисления с большими основаниями ($k \geq 8$) вызывает ожидаемое большое изменение степени использования ресурсов и энергетических показателей ЦИМ (об этом упоминалось в предыдущем разделе). Оно «выпадает» из общих тенденций зависимостей этих параметров (монотонное уменьшение или увеличение). Поэтому при реконфигурациях, не связанных с возникновением неисправностей, целесообразно не переходить в режим вычислений в системах счисления с такими основаниями.

Выводы

Предложенный метод динамической реконфигурации ЦИМ позволяет автономно управлять степенью использования ее ресурсов для адекватного условиям функционирования изменения энергетических характеристик и «обхода» неисправностей. Он заключаются в варьировании интенсивностью вычислительного процесса путем изменения порядка точности формулы интегрирования, а также основания

систем счисления, что стало возможным благодаря применению методов неавтономной арифметики. Сочетание этих параметров вычислений обеспечивает многорежимную работу ЦИМ, существенно изменяя ее основные характеристики, а также показатели функционирования цифровых интеграторов и коммутационной сети. При этом для сохранения работоспособности в сложных условиях эксплуатации предусматривается преднамеренная деградация точностных и скоростных характеристик ЦИМ, которые в более благоприятных условиях максимально возможно восстанавливаются. Проведенные теоретические и практические исследования показывают следующее.

1. Предложенный метод реконфигурации требует минимальных дополнительных аппаратных затрат и позволяет быстро адаптировать ЦИМ к разнообразным условиям функционирования.

2. Появляется возможность плавного изменения параметров энергопотребления, тепловой рассеиваемой мощности и степени задействования ресурсов ЦИМ в широком диапазоне значений. Это позволяет предотвратить возникновение неисправностей и сохранить ее работоспособность при множественных отказах различного характера без введения сложного оборудования.

3. Тактика перестраивания ЦИМ обеспечивает максимально возможное сохранение ее параметров точности и быстродействия при адаптации к различным неблагоприятным условиям.

4. Возможна эффективная реализация высоконадежных сложных ЦИМ на базе небольшого числа бюджетных микросхем FPGA, что часто оказывается существенно дешевле реализации ЦИМ в одной дорогой микросхеме.

Таким образом, разработанный метод динамического перестраивания позволяет повысить надежность и живучесть ЦИМ в сложных условиях.

Литература

1. Ковалев Н.А., Кравченко Н.И., Стефанович В.Т. Исследование метода реализации баллистического вычислителя на базе FPGA // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2007. – № 3 (24). – С. 42-47.
2. Каляев А.В. Теория цифровых интегрирующих машин и структур. – М.: Советское радио, 1970. – 472 с.
3. Jennifer Stephenson. Design Guidelines for Optimal Results in FPGAs. – San Jose: Altera Corp., 2006.
4. Michael Barr. A Reconfigurable Computing Primer // Multimedia Systems Design. – 1998. – Sept. – P. 44-47.
5. Cindy Kao. Benefits of Partial Reconfiguration // Xcell Journal. – 2005. – oct. – P. 65-67.
6. Жабин В.И., Ковалев Н.А. Реализация цифровых интеграторов на ПЛИС // Проблемы автоматизации и управления. – 2007. – № 1 (19). – С. 50-55.
7. Жабин В.И. Косвенный функциональный контроль вычислительных систем // Праці міжнародного симпозіуму «Комп'ютери у Європі. Минуле, сучасне та майбутнє». – К: «Фенікс» УАННП. – 1998. – С. 363-366.
8. Жабин В.И., Корнейчук В.И., Тарасенко В.П. Некоторые машинные методы вычисления рациональных функций многих переменных // Автоматика и телемеханика. – 1977. – № 12. – С. 145-154.

Nikolay Kovalyov

About the Method of Dynamic Reconfiguration of Digital Integrating Systems

Reconfiguration of digital integrating systems in process of computing is considered. The use of on-line arithmetic provides its multiversion reconfiguration and creates the prerequisites for improving reliability and liveness without insertion of complicated additional hardware.

Статья поступила в редакцию 17.07.2008.